

بررسی جریان همرفتی ایجاد شده توسط نور لیزر در مایعات به وسیلهٔ تداخل سنجی

محمد جعفری، روح‌الله کریم‌زاده و مسعود قورچی‌بیگی

دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

چکیده – در این مقاله تحول زمانی پدیده حرارتی همرفت که در اثر عبور باریکه لیزر از محیط مایع ایجاد می‌شود را مورد مطالعه قرار می‌دهیم. برای این منظور، نمونه شامل محلول ماده رنگی دای در اتانول را در سیستم تداخل سنجی قرار داده و سپس با استفاده از لیزر پمپ در نمونه جریان همرفتی ایجاد می‌کنیم. به وسیلهٔ عکسبرداری از زمان‌های مختلف تحول سیال، رفتار سیال را بعد از پمپ شدن مورد بررسی قرار داده و با استفاده از آنالیز فوریه و تحلیل هیدرودینامیکی جریان همرفتی، مدلی مناسب برای اندازه‌گیری پروفایل موضعی سرعت جریان همرفت به دست می‌آوریم.

کلید واژه- تداخل سنجی، آنالیز فوریه، جریان همرفتی، پاسخ ترمومتریکی

Study of convection heat flow induced by pump laser beam using interferometry

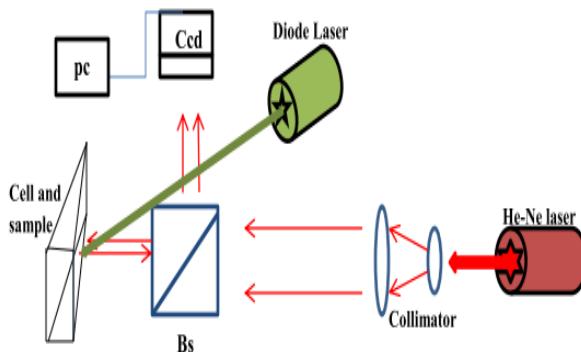
M. Jafari and R. Karimzadeh, M. G. Beygi

Department of physics, Shahid Beheshti University, Tehran

Abstract- In this work we have studied the time evolution of convective field induced by propagation of laser beam through the liquid samples. For this purpose the cell containing the red solution of dye in ethanol is placed in the interferometer setup. Then, the convection heat flow is induced in the sample by 532nm Gaussian laser beam. The profile of the flow velocity is investigated based on the Fourier analysis of the interferogram and hydrodynamic model for the convection current.

Keywords: Interferometry, Fourier analysis, Convective field, Thermo-optical response

طرحهای تداخلی ایجاد شده را با دوربین ccd فریم برثاییه ثبت می‌کنیم (شکل ۱). در این کار، از محلول ماده‌ی رنگی کبالت نیترات ۶ آبه $(Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O)$ در اتانول به عنوان نمونه، استفاده می‌شود. برای ایجاد جریان همرفتی نیز از لیزر دیودی $Nd:YVO_4$ با طول موج $532nm$ استفاده می‌شود. ضریب جذب خطی نمونه در طول موج لیزر پمپ ($532nm$) $0.25m^{-1}$ اندازه‌گیری شده است. وقتی نمونه در معرض باریکه‌ی لیزر پمپ قرار می‌گیرد، اختلاف فاز موضعی در نمونه ایجاد شده که باعث انحراف فریزهای تداخلی می‌شود.



شکل ۱- چیدمان تجربی آزمایش

۳- نتایج و بحث

تصاویر مربوط به تحول زمانی فریزهای تداخلی بعد از پمپ شدن در شکل ۲ نشان داده شده است. فاصله‌ی هر دو فریم متولی 25 ثانیه است و مشاهده می‌شود که بعد از 3 ثانیه به یک حالت پایدار می‌رسیم. در زمان $t=0$ پمپ روشن می‌شود. با توجه به تصاویر ثبت شده بعد از شروع پمپ یک توزیع شعاعی و نامتقارن حول منطقه‌ی داغ مرکز پمپ رشد می‌کند که باعث جریان همرفتی در سیال می‌شود، این جریان از داغترین ناحیه به سمت نواحی سرد رو به بالا حرکت می‌کند. با افزایش غلظت ماده‌ی رنگی در محلول و یا با افزایش شدت لیزر پمپ میزان اختلاف فاز ایجاد شده بیشتر می‌شود به طوری که شکل فریزها بیشتر تغییر می‌کنند. هنگامی که نور لیزر وارد محیط جاذب می‌شود، گرادیان دمایی متناسب با پروفایل گاوسی شدت لیزر در نمونه به وجود می‌آید، و متناسب با

۱- مقدمه

تا کنون از روش‌های متعددی برای مطالعه و بررسی ویژگیهای اپتیکی و حرارتی مایعات و سیالات استفاده شده است [۱, ۲]. تداخل سنجی روشی سریع و دقیق برای اندازه‌گیری خواص ترمومتریکی ماده و مشاهده‌ی تحول زمانی آن می‌باشد. در تداخل سنجی معمولاً نمونه در یکی از بازوهای تداخل سنج قرار گرفته و سپس با استفاده از لیزر در پاسخ نوری ماده تغییراتی ایجاد می‌شود. این تغییرات اختلاف فازی را در باریکه‌ی کاوش ایجاد می‌کند که با آنالیز آن خواص نوری ماده به دست می‌آید [۳, ۴]. همچنین بررسی جریان همرفتی سیال بعد از پمپ شدن از اهمیت و توجه خاصی برخوردار است. با تحلیل مناسب فریزهای تداخلی می‌توان نمایه‌ی تغییر فاز و در نتیجه تغییر ضریب شکست ناشی از پمپ را با دقت بالابه دست آورد [۶, ۵].

در این کار با استفاده از روش تداخل سنجی جریان همرفتی ایجاد شده در مایع در اثر عبور نور لیزر پمپ، مورد بررسی قرار گرفته است. برای تولید فریزهای تداخلی از چیدمان تداخل سنجی ساده‌ای شامل ظرف کوچک گوهای شکل استفاده شده است. این چیدمان برخلاف تداخل سنجهای دیگر که از دو بازو تشکیل شده‌اند، به نوسانات وارتعاشات حساس نمی‌باشد و فضای کمی را اشغال می‌کند. بررسی روی محلول رقیقی از کبالت نیترات ۶ آبه $(Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O)$ در اتانول انجام شده و با تحلیل فریزهای تداخلی و آنالیز هیدرودينامیکی، مدل مناسبی برای اندازه‌گیری پروفایل موضعی سرعت ارائه شده است.

۲- چیدمان تجربی

باریکه‌ی لیزر هلیوم نئون ($\lambda = 632.8nm$) بعد از موازی شدن از باریکه شکن عبور کرده و به ظرف گوه شکل شیشه‌ای برخورد می‌کند. قسمتی از باریکه از سطح اول ظرف که شیبدار است بازتاب و قسمتی دیگر بعد از عبور از نمونه از سطح دوم بازتاب می‌شود و بعد از بازگشت از محلول با باریکه اول تداخل می‌کند و طرح تداخلی تشکیل می‌دهد. این طرحهای تداخلی که شامل فریزهای خطی است به دلیل زاویه‌ی ظرف و پیمودن اختلاف راههای متفاوت از آن به وجود می‌آیند. تصاویر مربوط به

با تغییر ضریب شکست ایجاد شده تغییر فاز و در نتیجه تغییر شدت طرح تداخلی به صورت زیر بیان می شود:

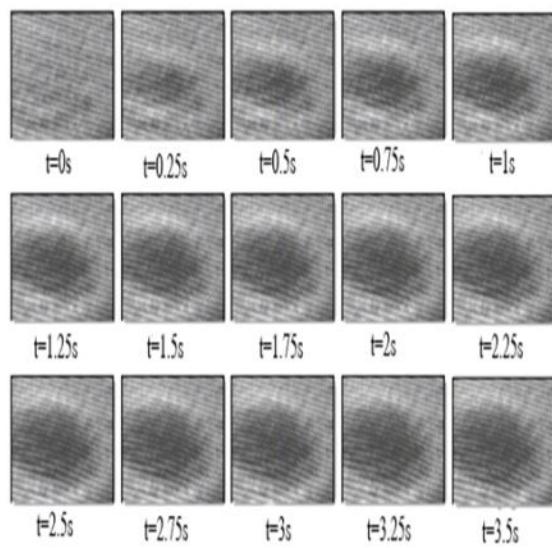
$$I(x,y,z) = I_0 [1 + \gamma \cos \Delta\varphi(x, y, z)] \quad (4)$$

$$\Delta\varphi(x, y, z) = \frac{4\pi[n(x, y, z) - n_0]e}{\lambda} \quad (5)$$

که در آن I_0 شدت لیزر هلیوم-نئون، γ نمایانی فریزها، e خاصت نمونه و λ طول موج لیزر هلیوم-نئون است که برای تشكیل طرح تداخلی ازان استفاده شده است. n_0 و $n(x, y, z)$ ضریب شکست نمونه قبل و بعد از پمپ شدن می باشد. به وسیله آنالیز فوریه دو بعدی اختلاف فاز، $\Delta\varphi$ ، ناشی از باریکه دمپ را به دست می آوریم. بدین منظور با انجام تبدیل فوریه دو بعدی بر روی طرح تداخلی و انتقال به فضای فرکانس دو توزیع متقارن نسبت به مرکز به دست می آید. یکی از این توزیعها را با فیلتر مناسب جدا می کنیم. این کار را بدون در نظر گرفتن لیزر پمپ ($t=0$) و همچنین برای حالته که لیزر پمپ از نمونه عبور داده شده است انجام می دهیم و با تقسیم نتایج حاصل از تبدیل فوریه معکوس برای توزیع فیلتر شده قبل و بعد از اعمال پمپ، اختلاف فاز گرمایی ناشی از اعمال لیزر پمپ را به دست می آوریم [8]. برای مشاهده تحول زمانی تغییر فاز، توزیع مکانی اختلاف فاز را در زمانهای $0/0.75/1/1.5/2/2.25/2.5/2.75/3/3.25/3.5$ ثانیه و $3/5$ ثانیه به دست می آوریم. (شکل ۲). با در نظر گرفتن اختلاف فاز به دست آمده و پروفایل شدت لیزر پمپ در محل برهمن کنش می توان ضریب ترمودینامیکی محلول را به دست آورد که مقدار آن $(K^{-1}) = 4.5 \times 10^{-4}$ می باشد. برای محاسبه توزیع فضایی سرعت با فرض اینکه حجم ثابت است (مایع محصور است) می توان از رابطه ترمودینامیکی زیر استفاده کرد:

$$pT^{-1} = \text{const} \quad (6)$$

با مشتق گرفتن از این رابطه، تغییرات فشار به تغییرات دما مرتبط می شود. با توجه به اینکه تحلیل جریان های دینامیکی سیال در شرایط غیر پایا بسیار پیچیده است و همچنین نمونه ای ما در زمان $t=3s$ به حالت پایا می رسد، به همین دلیل تغییرات فاز را در زمانهای بعد از $t=3s$ بررسی می کنیم. در چنین شرایطی برای سیال



شکل ۲- تحول زمانی فریزهای تداخلی بعد از پمپ شدن توسط باریکه ای لیزر

آن ضریب شکست نیز توزیع فضایی پیدا می کند. این تغییرات باعث می شود که نمونه همانند عدسی رفتار کردد، و نور عبوری از آن را همگرا یا واگرا کند که به اثر عدسی گرمایی معروف است. با توجه به تغییر ضریب شکست، اختلاف راه نوری به وجود آمده را می توان به صورت زیر نوشت [7]:

$$\Delta PL = \frac{dn}{dT} \int_0^L (T(x, y, z) - T_0) ds \quad (1)$$

برای هر فریز تداخلی، اختلاف راه نوری ΔPL ثابت می ماند و می توان نوشت:

$$\int_0^L (T(x, y, z) - T_0) ds = \frac{\Delta PL}{\frac{dn}{dT}} = \text{const} \quad (2)$$

انتگرال $\int_0^L (T(x, y, z) - T_0) ds$ را می توان به صورت $\bar{T} L$

نوشت که \bar{T} مقدار متوسط $(T(x, y, z))$ در راستای عبور پرتوی کاوش از نمونه می باشد. با فرض اینکه جریان گرمایی دو بعدی است و با در نظر گرفتن جذب خطی می توان گفت که در راستای عبور δ ، تغییر ضریب شکست در اثر تغییر دما را می توان به صورت زیر نوشت:

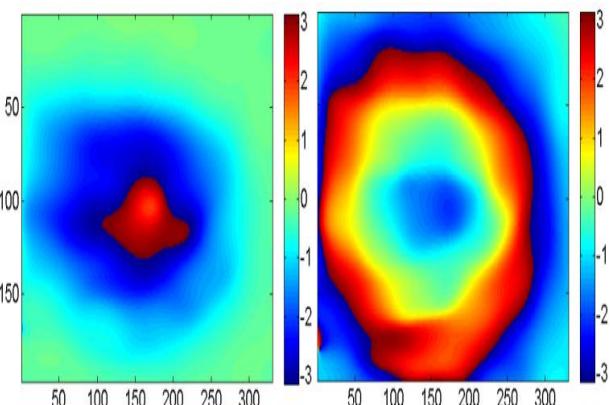
$$\Delta n = \frac{dn}{dT} \Delta T \quad (3)$$

۴-نتیجه‌گیری

در این مقاله تحول جریان همرفتی سیال بعد از پمپ شدن توسط باریکه‌ی لیزر مورد بررسی قرار گرفت. از آنالیز فوریه دو بعدی برای تحلیل فریزهای تداخلی استفاده شد. نشان داده شد تداخل سنجی می‌تواند روشی مناسب برای بررسی جریانهای همرفتی سیال باشد.

مراجع

- [1] V. P. KOZICH,* A. MARCANO O.,t F. E. CASTILLO HERNANDEZ, and J. A., *Use of Differential Thermal Lensing to Study Two-Photon Absorption in Solutions*, **APPLIED SPECTROSCOPY** Volume 48, Number 12, 1994
- [2] Young Ho Kim, Seong Jun Park, Sie-Wook Jeon, Seongmin Ju, Chang-Soo Park, Won-Taek Han, and Byeong Ha Lee, Thermo-optic coefficient measurement of liquids based on simultaneous temperature and refractive index sensing capability of a two-mode fiber interferometric probe, **OPTICS EXPRESS** Vol. 20, No. 21 / 23751
- [3] Z.Rafael Escalona, Rosi Carlo pace andtime,characterization of a thermal lens using an interferometric technique,**Opt. Eng.** 38 (9) (1999) 1591.
- [4] J A P Lima¹, E Marín^{1,3}, O Correa¹, M G da Silva¹, S L Cardoso¹, C Gatts¹, C E Rezende¹, H Vargas¹ and L C M Miranda², *Measurement of the thermal properties of liquids using a thermal wave interferometer*, J A P Lima *et al* 2000 **Meas. Sci. Technol.** 11 1522
- [5] L. Rodri'guez, C. Simos, M. Sylla, A. Marcano,X.NguyenPhu,*New holographic technique for third-Orderoptical properties measurement* , **Opt. Commun.** 247 (2005)
- [6] R. Escalona, *Study of a convective field induced by thermal lensing using* ,**Optics Communications** 281 (2008) 388–394
- [7] Goldstein. New York: Hemisphere Publishing Corporation; 1983(2nd ed. 1999).
- [8] L. Rodriguez, R. Escalona,, ,**Optics Communications** 277 (2007) 57–62.

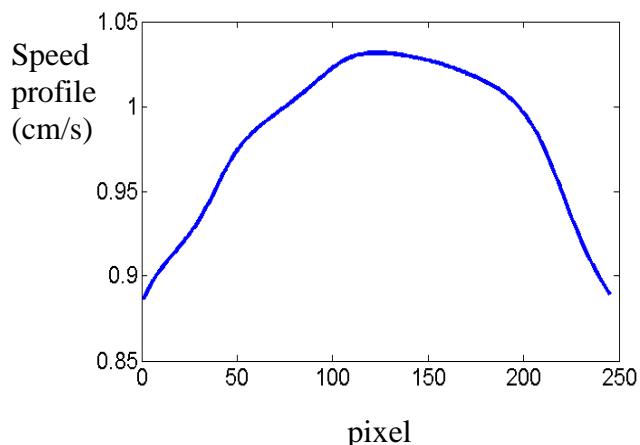


شکل ۳-نمایه‌ی تغییرات فاز در ثانیه ۰.۷۵ (چپ) و ۳.۵ (راست)

تراکم ناپذیر با جریان آرام می‌توان از معادله برنولی استفاده کرد:

$$\frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g z + P = \text{const} \quad (7)$$

برای به دست آوردن ثابت معادله‌ی (7) می‌توان از صفر بودن سرعت سیال در ته ظرف استفاده کرد. با توجه به شکل ۳ مقادیر تغییر فاز را در ثانیه‌ی ۳/۵ برای یک سطر از تصویر که از مرکز پمپ می‌گذرد به دست آورده و با استفاده از روابط (۳)، (۴)، (۵) تغییرات فشار را به دست می‌آوریم و به کمک تغییر فشار به دست آمده واستفاده از رابطه‌ی (7) می‌توان تغییرات سرعت را اندازه‌گیری کرد که در شکل ۴ نشان داده می‌شود. ملاحظه می‌شود که بیشترین سرعت جریان همرفتی در مرکز پمپ قرار دارد.



شکل ۴-نمایه‌ی موضعی سرعت برای یک سطر افقی(پیکسل ۱۰۴) از مرکز پمپ